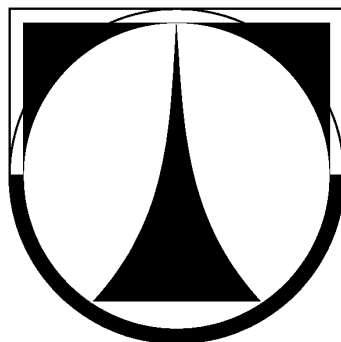


# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



## Bakalářská práce

Liberec 2011

Jaroslav Šrefl

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

## **Měření teplotního pole statorového vinutí**

## **Stator winding temperature field measurement**

Studijní program: B 2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

Autor: Jaroslav Šrefl

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Leoš Beran, Ph.D.

Konzultant: Ing. David Lindr



# Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

V Liberci 19. 5. 2011

.....

Jaroslav Šrefl

# Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Leoši Beranovi, Ph.D. za pomoc a odborné konzultace, které mi při tvorbě práce velmi pomáhaly. Také bych chtěl poděkovat své rodině a svým přátelům za jejich názory a psychickou podporu.

# Abstrakt

Cílem této práce je měřit teplotní pole asynchronního motoru při různých konfiguracích statorového vinutí. Výsledky měření jsou zpracovávány a na základě analýzy se pozoruje, jak se jednotlivé zkraty ve vinutí projevují uvnitř vinutí a na povrchu motoru.

V práci [4] bylo navrženo pracoviště pro měření teplotního pole. Toho je v této práci využito a s menšími úpravami je ponecháno. Menšími úpravami se rozumí přidání dynamometru pro zatížení elektromotoru a výměna napájecího zdroje. Měřeným objektem je speciálně upravený elektromotor, který má ze svého statorového vinutí vyvedeny odbočky, díky kterým jsme schopni ve vinutí vytvářet různé zkraty. Dále je uvnitř vinutí a na povrchu motoru rozmístěno 40 termočlánků, abychom měřené teplotní pole mohli sledovat.

Zkoumáním a porovnáváním naměřených průběhů oteplení byly zjištěny určité nesymetrie teplotního pole na povrchu motoru. Díky tomu dokážeme identifikovat zkrat ve vinutí teplotními senzory umístěnými pouze vně elektromotoru. V praxi by se toho dalo velmi dobře využít zejména jako aktivní ochrana před zničením izolace vodičů statorového vinutí vlivem vysoké teploty.

**Klíčová slova:** elektromotor, teplotní pole, vinutí

# Abstract

The goal of this thesis is the measurement of temperature field of asynchronous motor using different configurations of stator winding. The results are evaluated based on the analysis. The effects of individual short circuits in the winding and on the surface of the motor are observed.

The workplace for measuring the temperature field was designed at work [4]. This thesis works with that, adding only some minor changes. By minor changes we mean adding the dynamometer for straining electric motor and changing the power supply source. The measured object is a specially altered electric motor with branches out of its stator winding. These allow us to generate different short circuits in the winding. There are also 40 termocouples deployed in the winding and on the motor's surface, so that we can observe the measured temperature field.

By examining and comparing the measured charts of warming, some asymmetries of the temperature field on the surface of the motor, were detected. Thanks to that, we are able to identify the short circuit in the winding using only heat sensors based outside the electric engine. In practice we can use this mostly as an active protection from destruction of the wire insulation of stator winding due to high temperature.

**Keywords:** induction motor, field of temperature, winding

# Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Abstract.....	6
Obsah .....	7
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
1 Úvod.....	11
2 Měření teploty.....	12
3 Asynchronní elektromotor .....	14
3.1 Ztráty .....	14
3.2 Druhy zatížení .....	15
3.3 Dovolené oteplení .....	16
3.4 Tepelné chování v přechodných stavech.....	17
4 Pracoviště.....	19
4.1 Zdroj Chroma 61705 .....	20
4.2 Asynchronní motor Siemens .....	20
4.3 Dynamometr Dynofit .....	23
4.4 Měřicí ústředna Agilent 34970A a měřicí karty Agilent 34901A.....	24
4.5 Ovládání a sběr dat.....	24
5 Měření teplotního pole AM .....	25
5.1 Metodický postup měření.....	25
5.2 Společná nastavení pro všechna měření.....	27
5.3 Ověření funkčnosti pracoviště.....	28



5.4	Měření při různých konfiguracích vinutí statoru .....	30
5.4.1	Napětí 230 V, zkrat V5-N.....	31
5.4.2	Napětí 115 V, žádný zkrat .....	32
5.4.3	Napětí 115 V, zkrat V5-N.....	34
5.4.4	Napětí 115 V, zkrat U10-N.....	36
5.4.5	Napětí 115 V, zkrat U10-V5.....	38
5.4.6	Napětí 115 V, zkrat U30-U20.....	40
	Závěr .....	42
	Literatura.....	43

# Seznam obrázků

Obr. 2.1: Termočlánek .....	12
Obr. 2.2: Statické charakteristiky termočlánků [1] .....	13
Obr. 3.1: Závislost oteplení na čase [9] .....	17
Obr. 4.1: Blokové schéma pracoviště .....	19
Obr. 4.2: Termočlánky ve vinutí [4] .....	21
Obr. 4.3: Vnější termočlánky [4] .....	21
Obr. 4.4: Odbočky ve vinutí [4] .....	22
Obr. 4.5: Zapojení vinutí v motoru .....	22
Obr. 4.6: Aplikace IMTfield .....	24
Obr. 5.1: Průběh oteplení při jmenovitých parametrech .....	28
Obr. 5.2: Závislost teploty na poloze termočlánku v čase 2990 s .....	29
Obr. 5.3: Průběhy oteplení patek elektromotoru .....	30
Obr. 5.4: Průběh oteplení při jmenovitých parametrech se zkratem V5-N .....	31
Obr. 5.5: Průběh oteplení při spuštění nezatíženého motoru napřímo při napájecím fázovém napětí 115 V .....	32
Obr. 5.6: Průběh oteplení zatíženého motoru při $U_f = 115 \text{ V}$ .....	33
Obr. 5.7: Napájení 115 V, zkrat V5-N, naprázdno .....	34
Obr. 5.8: Napájení 115 V, zkrat V5-N, zatížen .....	35
Obr. 5.9: Napájení 115 V, zkrat U10-N, naprázdno .....	36
Obr. 5.10: Napájení 115 V, zkrat U10-N, zatížen .....	37
Obr. 5.11: Napájení 115 V, zkrat U10-V5, naprázdno .....	38
Obr. 5.12: Napájení 115 V, zkrat U10-V5, zatížen .....	39
Obr. 5.13: Napájení 115 V, zkrat U30-U20, naprázdno .....	40
Obr. 5.14: Napájení 115 V, zkrat U30-U20, zatížen .....	41

# Seznam tabulek

Tab. 2.1: Typy termočlánků [6] .....	13
Tab. 3.1: Druhy zatížení .....	15
Tab. 3.2: Tepelné třídy.....	16
Tab. 3.3: Maximální teploty izolovaného vinutí.....	17
Tab. 3.4: Tepelné časové konstanty [9] .....	18
Tab. 4.1: Štítkové údaje elektromotoru .....	23
Tab. 4.2: Parametry dynamometru .....	23
Tab. 5.1: Provedené měření .....	26
Tab. 5.2: Konstantní nastavení pro všechna měření .....	27
Tab. 5.3: Barevné značení.....	28
Tab. 5.4: Srovnání teplot při zkratu V5-N .....	35
Tab. 5.5: Srovnání teplot při zkratu U10-N .....	37
Tab. 5.6: Srovnání teplot U10-V5, naprázdno .....	38
Tab. 5.7: Srovnání teplot U10-V5, zatížen .....	39
Tab. 5.8: Srovnání U10-N a U30-U20 pro nezatížený motor.....	41
Tab. 5.9: Srovnání U10-N a U30-U20 pro zatížený motor .....	41

# 1 Úvod

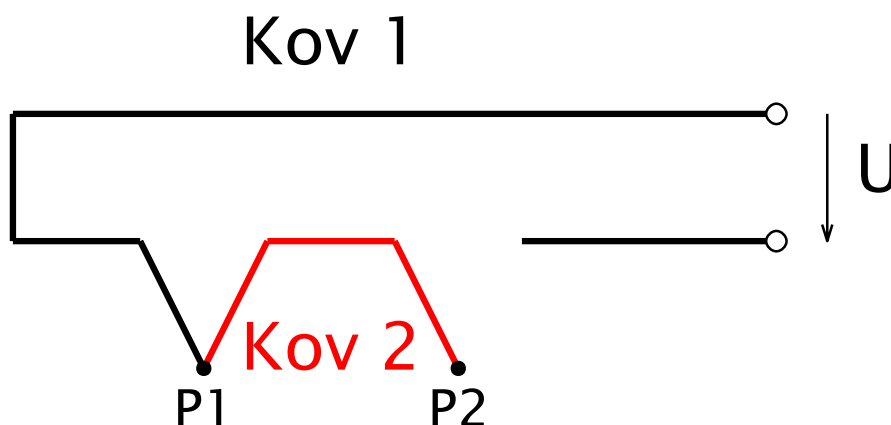
Pod pojmem elektromotor (dále jen AM) si představíme stroj, kterému musíme dodat energii v podobě elektrické, on ji transformuje na mechanickou a jeho výstupem bývá nejčastěji hřídel otáčející se nějakou rychlostí a s daným momentem dle výkonu motoru. Výstupem může být i pohyb posuvný, takovéto motory jsou potom označovány jako lineární.

Asynchronní motor s kotvou nakrátko řadíme mezi elektrické točivé stroje pracující se střídavým proudem. Tento typ elektromotoru je pro jeho jednoduchost spouštění a i jeho konstrukci nejrozšířenějším typem vůbec. Běžný asynchronní elektromotor při své činnosti dokáže pracovat s účinností 60 až 90% podle velikosti, zbytek jsou ztráty, které se vyzařují v podobě tepelné energie, důsledkem je zahřívání motoru. Chlazení motoru bývá samozřejmě navrženo tak, aby se jeho teplota při zatížení pohybovala v dovoleném rozsahu. Někdy ovšem může dojít k poškození izolace v nějakém místě vinutí statoru, většinou vlivem stárí nebo přetížení, a tím pádem dojde ke zkratu mezi závitů. V místě zkratu prudce vzroste teplota a poškodí izolaci okolních vodičů. Vznikající řetězový efekt ve výsledku způsobí zničení vinutí a tím také nefunkčnost stroje. Elektromotor je možno opatřit tepelnou ochranou, která spočívá v umístění 3 nebo 6 termistorů PTC a vyhodnocovací jednotky, jež při zvýšení teploty odpojí motor od napájení. Tato ochrana je ale nedostačující, protože menší zkraty mnohdy nemusí zaregistrovat. Navíc je to nadstandardní výbava, která není běžnou součástí motoru a musí se za příplatek zvlášť objednat. Jako aktivní tepelná ochrana by mohlo sloužit několik dobře rozmístěných teplotních čidel, které by monitorovaly teplotní pole asynchronního motoru a mikropočítač pro vyhodnocování dat. K tomu je potřeba zjistit jakým způsobem je teplotní pole závislé na různých zkratech ve vinutí, na zatížení a dalších faktorech ovlivňující oteplení stroje. Tato práce se právě snaží přiblížit problematiku v oblasti oteplování, což lze objasnit pouze velkým počtem měření a experimentů.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. Kapitola následující po úvodu se zabývá měřením teploty, další je věnována asynchronnímu motoru, ve čtvrté kapitole je popsáno pracoviště a použité přístroje. V poslední kapitole jsou pak zobrazeny naměřené průběhy a k nim příslušející komentáře. Vše uzavírá závěr.

## 2 Měření teploty

Velmi důležitým a rozšířeným způsobem měření teploty je pomocí termoelektrických senzorů (termočlánků). Jedná se o dotykové měření, protože čidlo je umístěno přímo v bodě, ve kterém teplotu měříme. Termoelektrické senzory jsou založeny na elektrickém principu a využívají Seebeckova jevu, to znamená, že se tepelná energie převádí na elektrickou. Termočlánek je zobrazen na obrázku 2.1, vznikne spojením dvou kovů (Kov 1, Kov 2) nebo slitin kovů. Abychom mohli změřit teplotu, potřebujeme dva takové spoje a změříme rozdíl potenciálů v těchto bodech (P1, P2). Tento rozdíl se nazývá termoelektrické napětí (U).

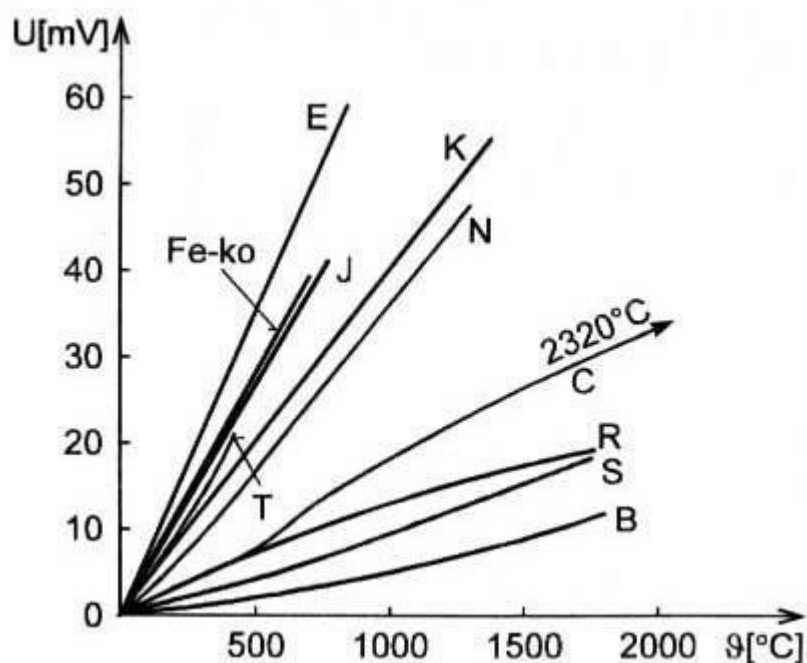


Obr. 2.1: Termočlánek

Z obrázku 2.2 je vidět, že závislosti termoelektrického napětí na teplotě jsou většinou téměř lineární a vystačíme si s popisem

$$U_{\vartheta} = A\vartheta + B\vartheta^2 + \dots, \text{ kde } \vartheta = \vartheta_M - \vartheta_S. \quad (1.1)$$

Měřené termoelektrické napětí je poměrně malé, při změně teploty o jeden stupeň celsia dojde k nárůstu napětí řádově o desítky mikrovoltů.



Obr. 2.2: Statické charakteristiky termočlánků [1]

Protože se jedná o pouhé spojení dvou materiálů, je jejich výroba poměrně levná. Materiály se volí tak, aby přírůstek napětí byl co největší, a zároveň měly dobrou odolnost vůči chemickým a mechanickým vlivům. Z jakých materiálů jsou jednotlivé typy termočlánků složeny, si můžeme prohlédnout v tabulce 2.1. Typy termočlánků se mohou lišit kromě použitých materiálů také v teplotním rozsahu a s jakou přesností dokážou teplotu stanovit.

Tab. 2.1: Typy termočlánků [6]

Typ	Materiál	Teplotní rozsah	Přesnost
B	Pt, Rh (30%) – Pt, Rh (60%)	250 °C – 1820 °C	± 0,5 °C
J	Fe – Ko	-210 °C – 1200 °C	± 1,1 °C – 2,2 °C
K	Ni, Cr – Ni, Al	-200 °C – 1370 °C	± 1,1 °C – 2,2 °C
T	Cu – Ko	-200 °C – 400 °C	± 0,5 °C – 1,0 °C
E	Ni, Cr – Ko	-200 °C – 1000 °C	± 1,0 °C – 1,7 °C
N	Nicrosil – Nisil	-200 °C – 1300 °C	± 1,1 °C – 2,2 °C
R	Pt, Rh (13%) – Rh	-50 °C – 1760 °C	± 0,6 °C – 1,5 °C
S	Pt, Rh (10%) – Pt	-50 °C – 1760 °C	± 0,6 °C – 1,5 °C

## 3 Asynchronní elektromotor

V této kapitole jsou popsány ztráty, ke kterým dochází v asynchronním motoru. Následně je zobrazeno s jakými druhy zatížení se u elektromotoru můžeme setkat. Ve třetí podkapitole jsou uvedeny dovolené teploty, které předepisují státní normy. Poslední část ukazuje teoretický průběh oteplovací křivky.

### 3.1 Ztráty

Žádný stroj převádějící energii z jedné formy na jinou nepracuje se stoprocentní účinností, tzn. bezztrátově. Ani asynchronní elektromotor není výjimkou a při jeho činnosti vznikají ztráty. Ztráty ( $P_z$ ) jsou definovány jako rozdíl energie, kterou dodáváme do motoru, označovaná jako příkon ( $P_1$ ) a energie, která z motoru vychází ve formě mechanického výkonu ( $P_2$ ).

$$P_z = P_1 - P_2 \text{ [W; W; W]} \quad (2.1)$$

Podíl těchto hodnot je pak označován jako účinnost stroje ( $\eta$ ).

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \text{ [%; W; W]} \quad (2.2)$$

Pokud zanedbáme ztráty v kabelech a spínacích prvcích, podle literatury [9] můžeme vycházet ze souvislosti, že celkové ztráty asynchronního elektromotoru se skládají ze ztrát:

- **Ve vinutích** – tyto ztráty tvoří 35 – 60 % celkových ztrát, tyto ztráty jsou dominantní zejména při zatíženém motoru. ( $\Delta P_j \sim I^2$ )
- **V magnetickém obvodu** – v magnetickém obvodu rozlišujeme ztráty vířivé ( $\Delta P_{Fe,v} \sim B^2 \cdot f^2$ ) a ztráty hysterezní ( $\Delta P_{Fe,h} \sim B^2 \cdot f$ ).
- **Mechanické** – složené ze ztrát třením ( $\Delta P_{mech,t} \sim \omega$ ) a ventilačních ztrát ( $\Delta P_{mech,v} \sim \omega^3$ )

## 3.2 Druhy zatížení

Pokud vybíráme elektromotor, důležitým parametrem je pro nás nejen jeho výkon, ale velmi důležité je také brát ohled na druh zatížení. Proto je pro dimenzování motoru potřeba analyzovat zatěžovací časový diagram. Jestliže potřebujeme roztočit motor s konstantní zátěží na dlouhou dobu, je volba poměrně jednoduchá. Zvolíme motor podle středního momentu s určitou rezervou pro případné přetížení. Pokud je ovšem naše zátěž proměnná, je situace mnohem složitější. Při opakovaných rozbězích motoru vznikají velké ztráty a tím roste i jeho teplota. Norma ČSN 350000 část 1 rozlišuje 8 druhů zatížení označené S1 až S8, jak uvádí tabulka 3.1.

Tab. 3.1: Druhy zatížení

Označení	Název
S1	Trvalé zatížení
S2	Krátkodobý chod
S3	Přerušovaný chod
S4	Přerušovaný chod se spínacími ztrátami při rozběhu
S5	Přerušovaný chod se spínacími ztrátami při rozběhu a elektrické brzdění
S6	Přerušované zatížení
S7	Přerušované zatížení se spínacími ztrátami při změně rychlosti
S8	Přerušované zatížení se spínacími ztrátami při reverzacích

V [9] je trvalé zatížení (S1) popisováno jako zatížení se stálým nebo proměnným momentem a stálou nebo proměnnou rychlostí, přičemž motor při tomto zatížení dosáhne ustálené teploty přibližně za trojnásobek tepelné časové konstanty. Pokud máme k motoru připojený dynamometr, lze zatížení S1 poměrně lehce dosáhnout nastavením právě konstantního momentu, či otáček. Využijeme toho tedy pro zatěžování našeho motoru, na kterém měříme teplotní pole. Pokud by motor byl zatížen konstantním momentem, ale nedosáhl by ustálené teploty, jednalo by se o chod krátkodobý (S2).



### 3.3 Dovolené oteplení

Kvůli ztrátám, ke kterým dochází při chodu asynchronního stroje, se samotný motor zahřívá. Výrobce proto udává u každého asynchronního motoru, v jaké teplotní třídě je motor vyroben. Z toho následně vyplývají i maximální dovolené teploty pro daný stroj. Norma ČSN 350000 udává tepelné třídy izolace vinutí a jejich maximální teploty [7], viz tab. 3.2.

Tab. 3.2: Tepelné třídy

<b>Tepelná třída izolace</b>	<b>Teplota třídy [°C]</b>	<b>Oteplení statoru [°C]</b>	<b>Oteplení rotoru [°C]</b>
A	105	60 – 65	60
E	120	75	75
B	130	80 – 85	80
F	155	100 – 110	105
H	180	125 – 130	125

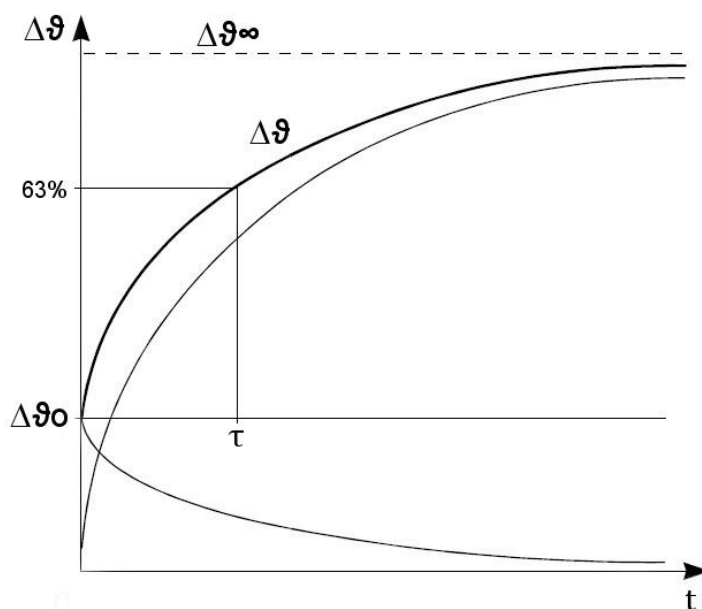
V tabulce 3.2 můžeme vidět maximální teploty vinutí pro přetížení. Norma ČSN EN 60034-11 (350000) [8] rozlišuje maximální teplotu pro přetížení s pomalou změnou, to je teplota, při které ještě nedochází k poničení izolace vinutí ani při dlouhodobém přetížení, ale životnost motoru se překročením maximální teploty třídy snižuje rychleji. K tomuto přetížení může dojít například velkým množstvím prachu na chladicí části, zvýšením okolní teploty nebo poklesem napájecího napětí. Krátkodobě může vinutí stroje dosáhnout až teploty pro přetížení s rychlou změnou. Překročením této teploty ovšem může dojít k nevratným změnám ve vinutí. Příčinou může být zabrzdění motoru, zkrat ve vinutí, či opakované spuštění během krátké doby.

Tab. 3.3: Maximální teploty izolovaného vinutí

Tepelná třída izolace	B	F	H
Maximální teplota izolovaného vinutí pro přetížení s pomalou změnou [°C]	145	170	195
Maximální teplota izolovaného vinutí pro přetížení s rychlou změnou [°C]	225	240	260

### 3.4 Tepelné chování v přechodných stavech

Teplo, způsobené vzniklými ztrátami ve stroji, se přenáší vedením, prouděním a sáláním do okolního vzduchu, případně chladicího média. Tento jev můžeme popsat závislostí oteplení stroje na čase, kterou zobrazuje obrázek 3.1. Dle [9] je výsledná oteplovací křivka dána součtem dvou křivek, jedna znázorňuje zvyšování oteplení stroje, druhá naopak odvod tepla do okolí. Jestliže nastane případ, kdy se veškeré ztrátové teplo odvádí do okolí, mluvíme o tzv. ustáleném stavu. Oteplovací křivka se od tohoto momentu stává vodorovnou přímkou.



Obr. 3.1: Závislost oteplení na čase [9]

Matematickým zápisem lze oteplovací křivku popsat rovnicí

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{\vartheta}}} + \Delta\vartheta_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{\vartheta}}}\right). \quad (2.3)$$

Tepelná časová konstanta  $\tau_{\vartheta}$  se vyjádří jako podíl náhradní celkové tepelné kapacity stroje  $C [J \cdot K^{-1}]$  a náhradního součinitele přestupu tepla do okolí  $A [W \cdot K^{-1}]$ . Tyto konstanty lze rozepsat dle vztahu 2.5. V čase  $\tau_{\vartheta}$  dosáhne stroj přibližně 63 % hodnoty ustáleného oteplení. Ustálené oteplení  $\Delta\vartheta_{\infty}$  je dáno vztahem

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{\Delta P}{A}, \quad (2.4)$$

kde  $\Delta P [W]$  jsou celkové ztráty stroje.

$$\tau_{\vartheta} = \frac{C}{A} = \frac{c \cdot m}{\alpha \cdot S} \quad (2.5)$$

$c [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$  ..... měrná tepelná kapacita

$m [kg]$  ..... hmotnost stroje

$\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$  ..... koeficient přestupu tepla

$S [m^2]$  ..... ekvivalentní ochlazovací plocha

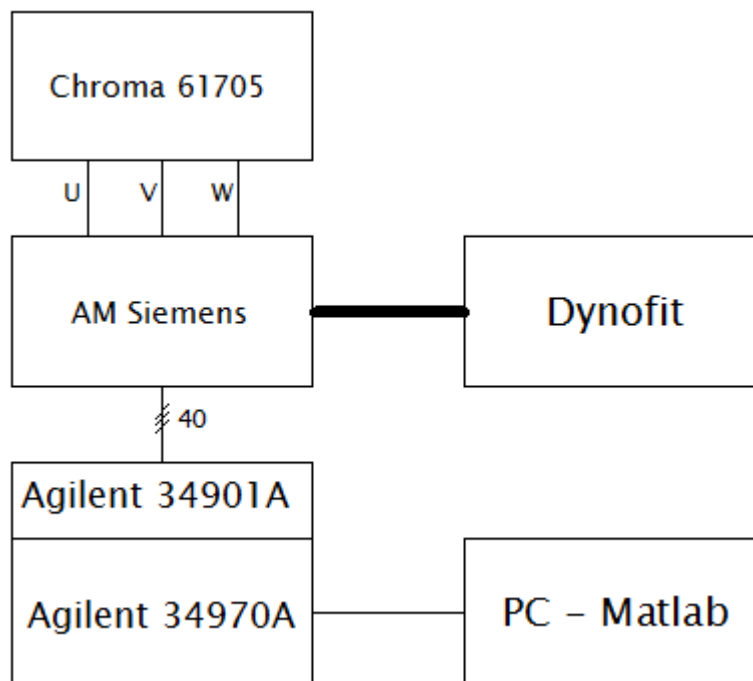
Výše uvedené vztahy jsou odvozené pro velmi zjednodušený model elektromotoru, dokonce AM je brán jako homogenní těleso. Musíme tedy počítat s tím, že se průběh oteplení na čase reálného stroje bude lišit od obr. 3.1. V praxi se proto tepelná časová konstanta určuje experimentálně a to tak, že se zprůměrují hodnoty pro  $\Delta\vartheta = 0$ ,  $\Delta\vartheta = 0,5 \cdot \Delta\vartheta_{\infty}$  a  $\Delta\vartheta = 0,8 \cdot \Delta\vartheta_{\infty}$ . Tepelné časové konstanty nejběžnějších typů motorů jsou uvedeny v tabulce dole.

Tab. 3.4: Tepelné časové konstanty [9]

Typ elektromotoru	$\tau$ [min]
Malý	5 – 22
Střední s cizím chlazením	20 – 40
Velký s cizím chlazením	30 – 50
Uzavřený s vlastním povrchovým chlazením	60 – 120
V nevýbušném provedení	120 – 240

## 4 Pracoviště

V kapitole pracoviště budou popsány základní vlastnosti jednotlivých přístrojů, které byly používány během měření. Měřicí pracoviště se skládá ze zdroje Chroma 61705, kterým je napájen speciálně upravený asynchronní motor značky Siemens. K motoru je připojen dynamometr Dynofit pro případné zatěžování. Teplotní pole je měřeno pomocí měřicích karet Agilent 34901A a měřicí ústředny Agilent 34970A. Data se ukládají do PC prostřednictvím Matlabu. Celé pracoviště je znázorněno v níže zobrazeném blokovém schématu.



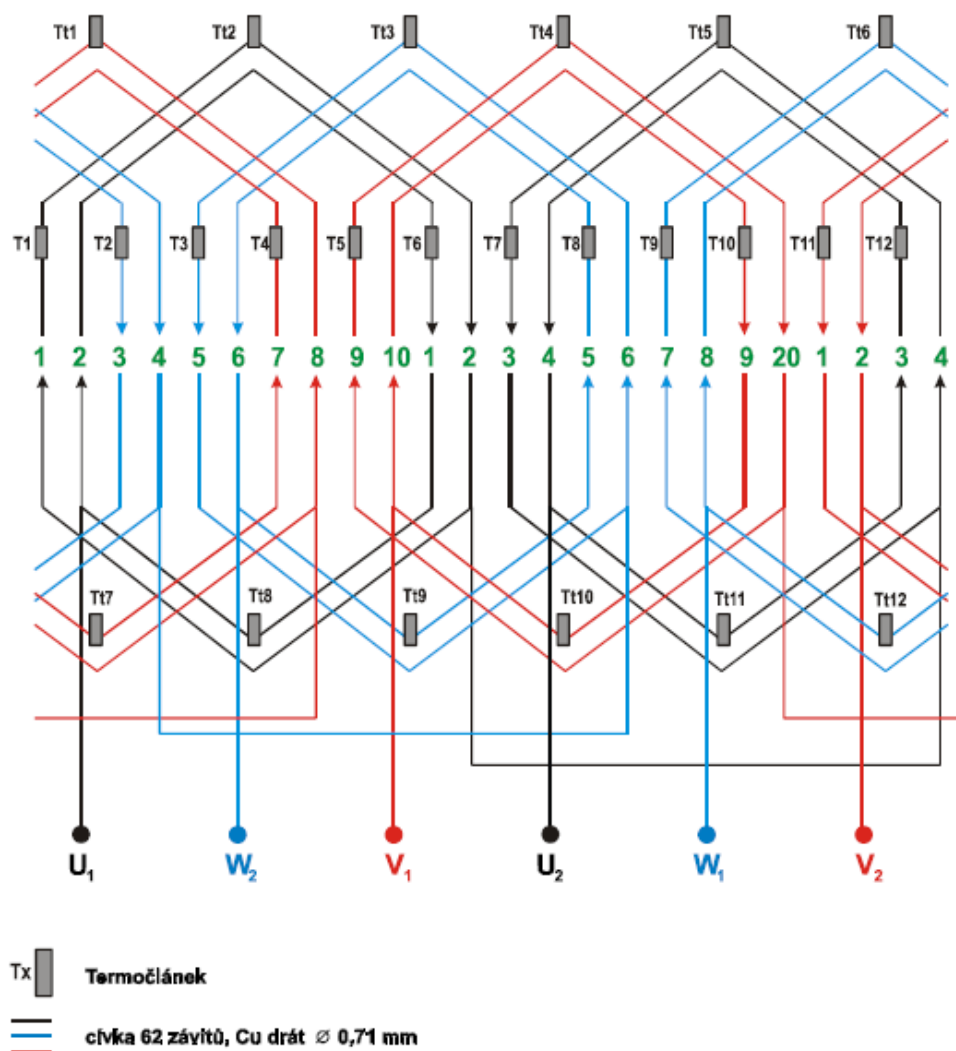
Obr. 4.1: Blokové schéma pracoviště

## 4.1 Zdroj Chroma 61705

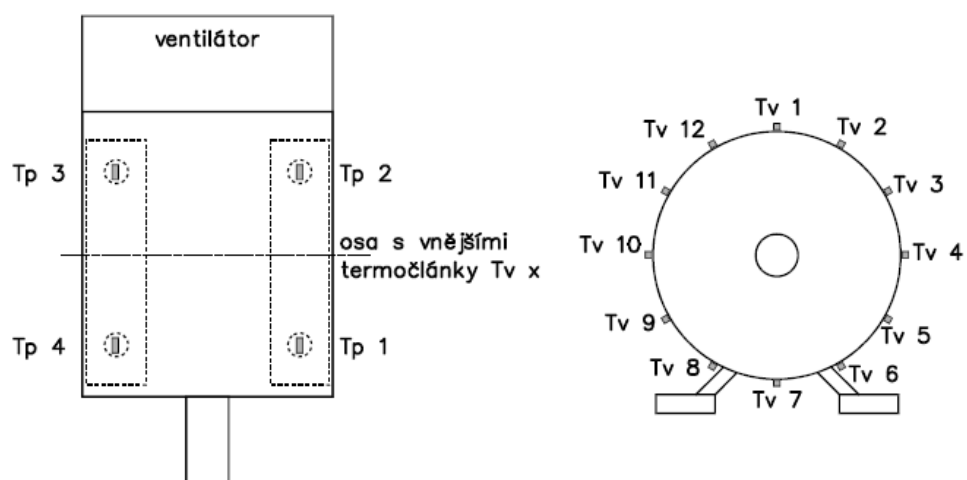
Chroma 61705 [3] je programovatelný třífázový zdroj střídavého napětí. Lze nastavovat napětí 0 až 300 V individuálně pro každou fázi nebo pro všechny tři fáze stejné. Nastavit můžeme fázový posun  $0^\circ$  -  $360^\circ$  a frekvenci 15 - 1200 Hz. Zdroj je schopen generovat velmi čisté střídavé napětí se zkreslením menším než 0,3 %. Umožňuje nastavení proudového a napěťového omezení, měřit napětí, proud, výkon, účinník, atd. V našem případě potřebujeme pouze napájet elektromotor konstantním napětím, takže využijeme skutečně jen základní funkce.

## 4.2 Asynchronní motor Siemens

Pro všechny níže uvedené experimenty je použit speciálně upravený třífázový asynchronní motor od firmy Siemens. Aby bylo možné měřit teplotní pole, musí motor obsahovat čidla pro měření teploty. Vzhledem k teplotnímu rozsahu a dostupnosti byly jako čidla zvoleny termočlánky typu J. Celkem je použito 40 termočlánků, 24 jich je umístěno uvnitř a 16 vně motoru. 12 vnitřních termočlánků se nachází ve drážkách vinutí a 12 na čelech vinutí. Kde přesně jsou umístěny jednotlivé termočlánky ve vinutí, si můžeme prohlédnout na obrázku 4.2. Zbylé vnější termočlánky se na motoru nacházejí dle obrázku 4.3. Takovýmto způsobem elektromotor upravila firma Siemens elektromotory s.r.o.

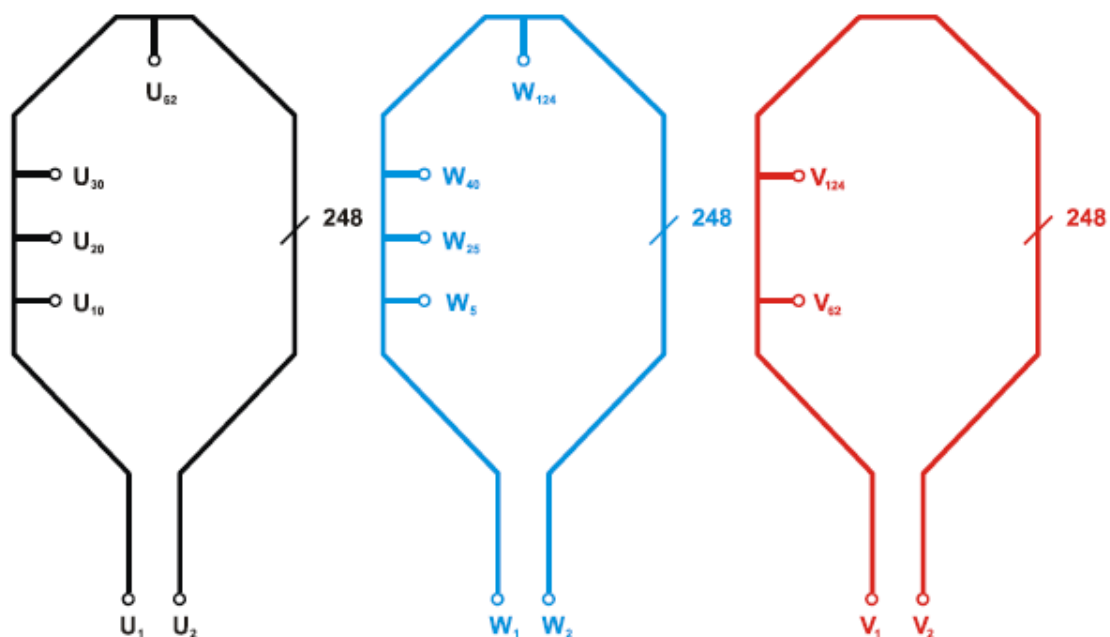


Obr. 4.2: Termočláanky ve vinutí [4]

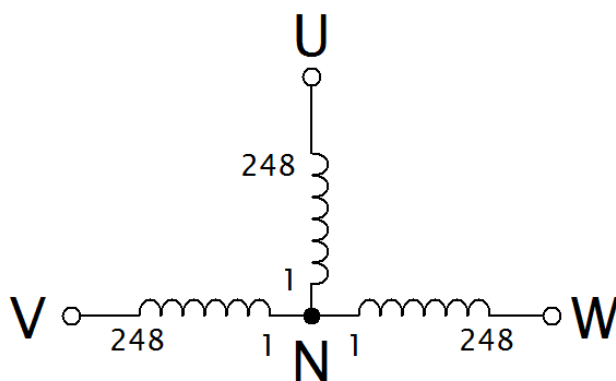


Obr. 4.3: Vnější termočláanky [4]

Elektromotor má 3 vinutí po 248 závitů zapojené do hvězdy, jak lze vidět na obrázku 4.5. Z jednotlivých vinutí statoru jsou vyvedeny odbočky na určitých závitů. Závit číslo 1 je vždy nejbližší uzlu N (viz obr. 4.5). Díky tomu můžeme simulovat různé typy zkratů ve vinutí tohoto motoru. Odbočky jsou znázorněny na obrázku 4.4. Přesný typ a základní vlastnosti motoru udávané na jeho štítku jsou popsány v tabulce 4.1.



Obr. 4.4: Odbočky ve vinutí [4]



Obr. 4.5: Zapojení vinutí v motoru

Tab. 4.1: Štítkové údaje elektromotoru

Typ	1LA7090-2AA90-Z
Napájecí napětí	230/400 V D/Y
Jmenovitý proud	5,65/3,25 A
Jmenovitý výkon	1,5 kW
Jmenovité otáčky	2860 ot./min
Frekvence	50 Hz
Účinník	0,85

### 4.3 Dynamometr Dynofit

Zkušební pracoviště Dynofit [5] se skládá z asynchronního dynamometru ASD 6,3K-4 a řídicí jednotky M350. Obě dvě části vyrábí VUES Brno. Přístroj je schopen pracovat ve dvou režimech. Režim pohon nám umožňuje roztočit připojený motor na dané otáčky nebo s určitým momentem. Druhý režim brzda naopak motor zatěžuje zvoleným momentem, či udržuje stroj na konstantních otáčkách. Zatěžovat motor lze i v režimu pohon, ale vlivem tepelných ztrát je zatížitelnost stroje v režimu brzda vyšší.

V tab. 4.2 jsou uvedeny maximální parametry pracovní oblasti dynamometru při daných otáčkách. Pro účely našeho měření je Dynofit ve všech směrech vyhovující. S velkou rezervou vystačí pro zatěžování motoru, jehož výkonové parametry jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.2: Parametry dynamometru

ASD 6,3K-4	Režim	
	Brzda	Pohon
$M_{n2}$ [Nm]	20	19,4
$n_{n2}$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	3000	2800
$U_{n2}$ [V]	380	
$f_{n2}$ [Hz]	98	95,6



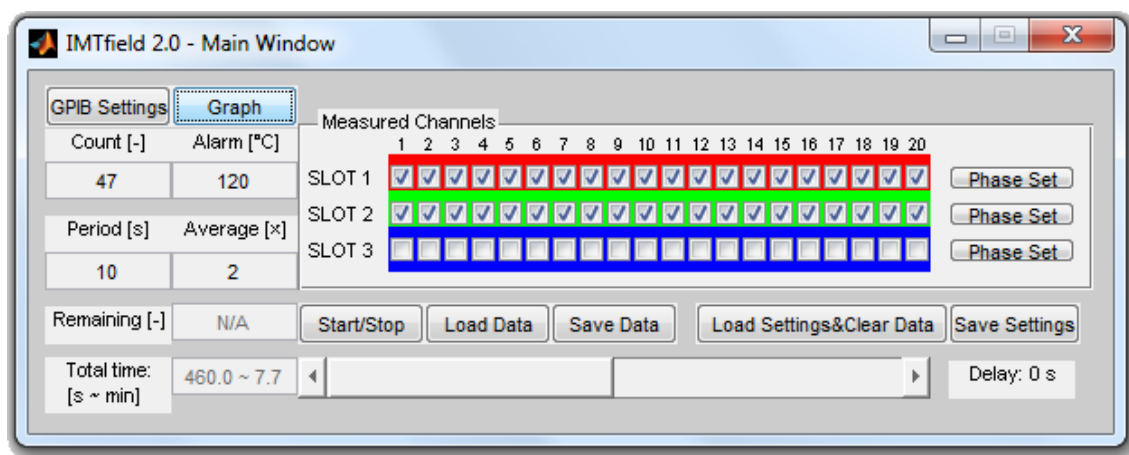
## 4.4 Měřicí ústředna Agilent 34970A a měřicí karty

### Agilent 34901A

V práci [4] je uvedeno, že našemu pracovišti dle svých parametrů nejvíce vyhovuje právě měřicí ústředna Agilent 34970A a v ní vložené měřicí karty Agilent 34901A. Ze stránek výrobce [6] můžeme vyčíst jejich vlastnosti.

## 4.5 Ovládání a sběr dat

Měření teplotního pole se řídí aplikací IMTfield, která je napsaná v prostředí Matlab. Grafické znázornění základního okna ukazuje obrázek 4.6. Zdrojový kód této aplikace je uveden v příloze diplomové práce [4]. Měřicí ústřednu lze ovládat pochopitelně i jinými způsoby, jako např. vlastní aplikací psanou v jazyce C nebo přímo výrobcem dodaným software Agilent BenchLink Data Logger.



Obr. 4.6: Aplikace IMTfield

Používaná aplikace IMTfield nabízí mnoho doplňkových funkcí, které pro měření nejspíš ani nebudou využity. Jediným zpozorovaným nedostatkem je nemožnost zobrazit průběh oteplení dříve než po ukončení měření. To je ovšem komfort, bez kterého se lze obejít.

## 5 Měření teplotního pole AM

Tato kapitola se věnuje samotnému měření teplotního pole. V první části je popsáno, jakým způsobem se vybíraly různé konfigurace statorového vinutí pro měření. Další část popisuje především nastavení aplikace IMTfield, při kterém měření probíhalo. V podkapitole 5.3 je ověřena funkčnost pracoviště a poslední část se věnuje měření teplotního pole při různých zkratech ve vinutí.

### 5.1 Metodický postup měření

Jako první krok bylo provedeno měření průběhu oteplení při běžných podmínkách pro motor, tzn. jmenovité parametry uvedené výrobcem na štítku motoru. Toto měření by se dalo nazvat jako seznamovací nebo ověření funkčnosti pracoviště. Cílem bylo osahat si měřicí přístroje, zkontrolovat funkčnost pracoviště, a také si udělat obrázek o výši teplot, kterých motor dosahuje.

Dále nás zajímalo, jaké škody napáchá jeden zkrat ve vinutí, pro jistotu byl zvolen nejmenší možný (V5-N). Z tohoto měření vzešlo, že i ten nejmenší zkrat způsobí moc velký výkyv teploty v jisté oblasti, proto bylo pro další měření zmenšeno napájecí napětí na polovinu.

Při sníženém napájecím napětí byla opět provedena měření bez zkratu ve vinutí (naprázdno i pro zatížený motor), abychom zjistili, jak moc se sníží teplota motoru vlivem změny napájecího napětí. Zároveň tato měření slouží jako referenční, podle kterých se určí, jaké termočlánky registrují zvýšenou teplotu při různých zkratech. Teplota motoru značně poklesla, a tak další měření probíhala již se zkratem ve vinutí statoru.

Opět byl nejdříve zvolen nejmenší proveditelný zkrat o pěti závitěch, V5-N. I v tomto případě proběhlo měření pro zatížený a nezatížený motor. Teplota v žádném místě nepřesahovala dovolenou mez, a proto v následujícím měření byl vytvořen zkrat o velikosti 10 závitů, U10-N. Zkrat se nachází na jiné fázi, tudíž je sledováno, o kolik teplota vzroste a v jakých místech. Pro další dvojici měření opět zvětšíme zkrat,

tentokrát na 15 závitů, to lze nastavit pouze propojením svorek U10 a V5. Pozornost je upřena hlavně na porovnání s předešlými zkraty (V5-N, U10-N).

Při větším zkratu než 15 závitů teplota přesahovala maximální dovolenou teplotu, a tak měření nebylo dokončeno, aby nedošlo k poškození motoru. Poslední dvě měření proběhla při zkratu U30-U20 s otázkou, co se změní, když ten samý zkrat vytvoříme o kousek dále od středu vinutí. Provedená měření jsou uvedena v tabulce.

Tab. 5.1: Provedené měření

<b>Číslo měření</b>	<b>Fázové napětí [V]</b>	<b>Zkrat</b>	<b>Zatížení</b>
1	230	Žádný	Ano
2	230	V5-N	Ano
3	115	Žádný	Ne
4	115	Žádný	Ano
5	115	V5-N	Ne
6	115	V5-N	Ano
7	115	U10-N	Ne
8	115	U10-N	Ano
9	115	U10-V5	Ne
10	115	U10-V5	Ano
11	115	U30-U20	Ne
12	115	U30-U20	Ano

## 5.2 Společná nastavení pro všechna měření

Veškeré měření, popisované v této kapitole, spojují některá nastavení, která zůstávala stejná, a nebylo zapotřebí jej měnit. V první řadě je to frekvence napájecího napětí, v naší elektrické síti máme standardně  $50\text{ Hz}$ , a proto byla tato frekvence určena i pro všechna měření v laboratoři.

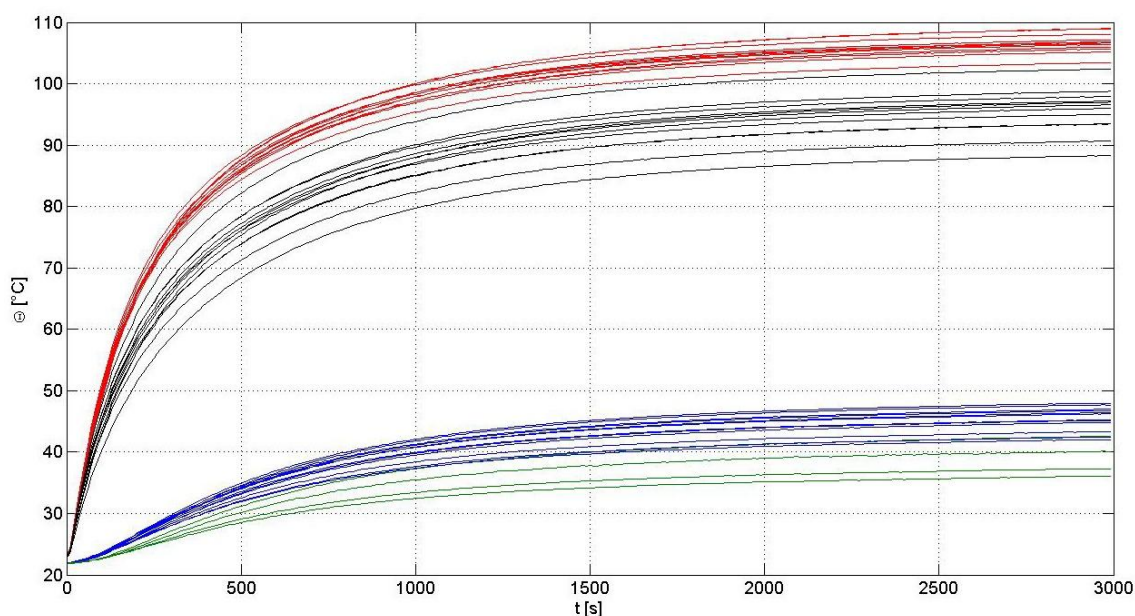
Dále také nastavení některých parametrů aplikace IMTfield zůstávalo neměnné. Adresa GPIB (GPIB Settings) musela být nastavena na hodnotu 9 pro správnou komunikaci mezi měřicí ústřednou a PC. Perioda měření (Period) byla zvolena 10 s, to znamená, že každých deset sekund se odečtou data z měřených termočlánků. Číslo v kolonce Count udává počet odečtených vzorků. Volba byla 300, pokud toto číslo vynásobíme periodou, dostaneme čas celého měření. Alarm slouží jako indikátor nebezpečně vysoké teploty. Do této buňky zadáme teplotu, které když dosáhne jeden z termočlánků, u aplikace se nastaví výstražné červené pozadí. Vzhledem k tepelné třídě F byl alarm nastaven na  $155\text{ °C}$ . Data se získávala vždy ze všech 40 – ti termočlánků. Pro vykreslování naměřených hodnot do grafů však byly použity pouze ty, které byly pokládány za vhodné. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivá nastavení uvedena v tabulce dole.

Tab. 5.2: Konstantní nastavení pro všechna měření

Parametr	Hodnota
Frekvence	50 Hz
GPIB Settings	9
Period	10 s
Count	300
Alarm	155 °C

## 5.3 Ověření funkčnosti pracoviště

Hlavním účelem tohoto měření bylo otestovat funkčnost všech přístrojů, termočlánků, zjistit jak se jednotlivé části AM zahřívají a k jak vysokým teplotám dochází. Výrobce motoru udává jmenovité fázové napětí 230 V a zatížení 4,54 Nm, které odpovídá jmenovitým otáčkám  $2860 \text{ min}^{-1}$  (viz tab. 4.1). Výsledek měření při těchto parametrech je znázorněn na obrázku 5.1, kde je zobrazen průběh všech termočlánků zachycující teplotní pole AM. Pole můžeme rozřadit do různých oblastí podle umístění jednotlivých čidel a podle toho, k jak vysokým teplotám dochází. V grafu jsou průběhy barevně odlišovány podle tabulky 5.3.

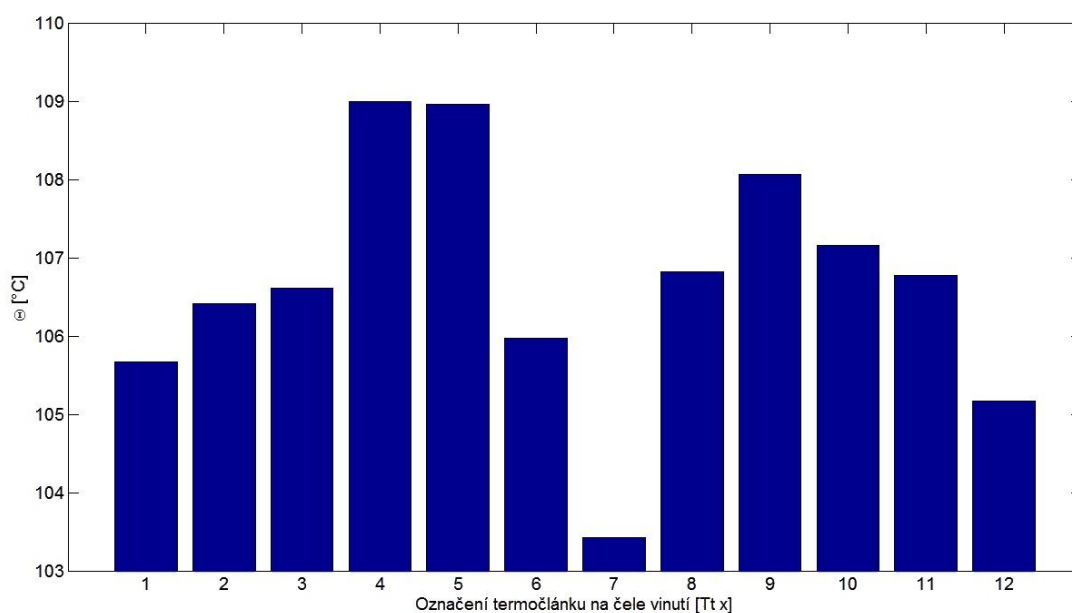


Obr. 5.1: Průběh oteplení při jmenovitých parametrech

Tab. 5.3: Barevné značení

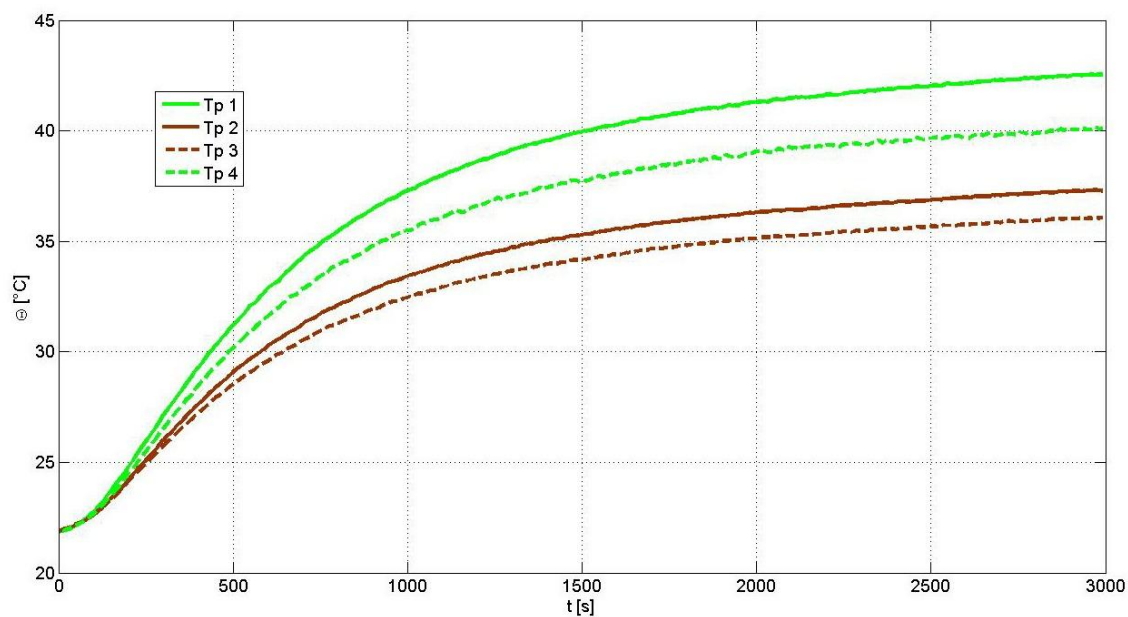
Umístění termočlánků	Barva
Čela vinutí (Tt x)	Červená
Drážky vinutí (T x)	Černá
Povrch elektromotoru (Tv x)	Modrá
Patky elektromotoru (Tp x)	Zelená

Z grafu 5.1 lze vyčíst, že k nejvyšším teplotám dochází na čelech vinutí. Dá se očekávat, že čela vinutí, které se nalézají na straně ventilátoru, budou lépe chlazena a jejich teplota bude nižší než u čel nacházejících se na opačné straně než je ventilátor. Měření bohužel toto očekávání úplně nepotvrdilo, což můžeme spatřit ze sloupcového grafu 5.2, který porovnává teploty termočlánků umístěných na čelech vinutí v čase 2990 s. U termočlánků umístěných v drážkách vinutí statoru pozorujeme o něco nižší teploty než na čelech vinutí.



Obr. 5.2: Závislost teploty na poloze termočlánku v čase 2990 s

Rozdíl mezi teplotami uvnitř a vně motoru je z obr. 5.1 vidět na první pohled. Termočlánky  $T_v x$  jsou umístěny po obvodu přibližně na středu délky motoru, proto očekáváme, že budou vykazovat zhruba stejné hodnoty kromě těch, které se nalézají v blízkosti patek elektromotoru. Ocelové patky odvádí teplo lépe než vzduch, proto by zde teplota mohla být o něco nižší. Na patkách elektromotoru jsou teploty nejnižší, protože se nalézají také nejdále od zdroje tepla, čímž jsou ve velké míře ztráty ve statorovém vinutí. Tato teplota je závislá na tom, zda je patka blíže, či dále ventilátoru. To je dobře vidět na obrázku 5.3, kde jsou zobrazeny samotné průběhy oteplení patek elektromotoru. Z obr. 4.3 je jasně viditelné, že  $T_p 2$  a  $T_p 3$  se nacházejí blíže ventilátoru, tomu také odpovídají naměřené průběhy.



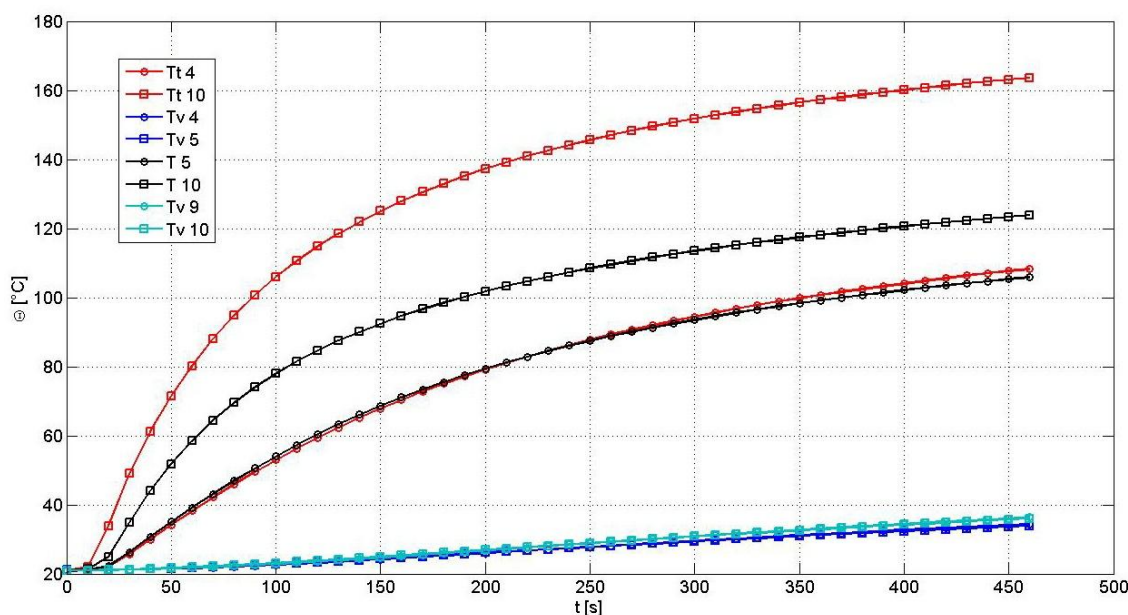
Obr. 5.3: Průběhy oteplení patek elektromotoru

## 5.4 Měření při různých konfiguracích vinutí statoru

V této podkapitole jsou zobrazeny naměřené průběhy oteplení při zvolených zkratech ve statorovém vinutí. Pro každý zkrat proběhlo měření při zatíženém i nezatíženém elektromotoru, s výjimkou prvního měření této podkapitoly. K jednotlivým průběhům jsou přidány komentáře popisující jevy, které z nich lze odečíst.

### 5.4.1 Napětí 230 V, zkrat V5-N

Na obrázku 5.4 vidíme teplotní pole pro stejné parametry jako v předchozím případě (Obr. 5.1) s tím rozdílem, že zde je navíc ve statorovém vinutí vytvořen zkrat mezi odbočkou V5 a uzlem N (středním vodičem). Propojením těchto svorek tedy zkratujeme prvních pět závitů ve vinutí V. Jedná se o nejmenší možný zkrat, který jsme schopni na dostupných odbočkách zrealizovat. V místě zkratu roste teplota nejrychleji, což můžeme na obrázku 5.4 pozorovat. Nejblíže se nacházejícím senzorem teploty je termočlánek Tt 10. Teplota v tomto místě po 400 sekundách překračovala hranici 160 °C, a proto bylo nutné měření přerušit, aby nedošlo k poškození izolace vinutí. Zvýšenou teplotu můžeme pozorovat i v drážce vinutí T 10. To je pochopitelné, protože drážkou, ve které je termočlánek T 10 umístěn, prochází prvních 62 závitů vinutí V. Zde, ale už nedochází k překročení dovoleného oteplení. Mírně zvýšenou teplotu pozorujeme i u T 5, to lze přičíst tomu, že tato drážka sousedí právě s T 10. Na čele vinutí Tt 4, kudy prochází závity 63 až 124 fáze V, již zvýšenou teplotu nepozorujeme. I když měření probíhalo jen necelých 8 minut a vnějšek motoru se nestihl příliš oteplít, je zde vidět, že dolní levá část motoru (z pohledu na obr. 4.3) se oteplila více, konkrétně termočlánky Tv 9 a Tv 10. Lze tedy usoudit, že zkrat bude nejspíš v této oblasti.



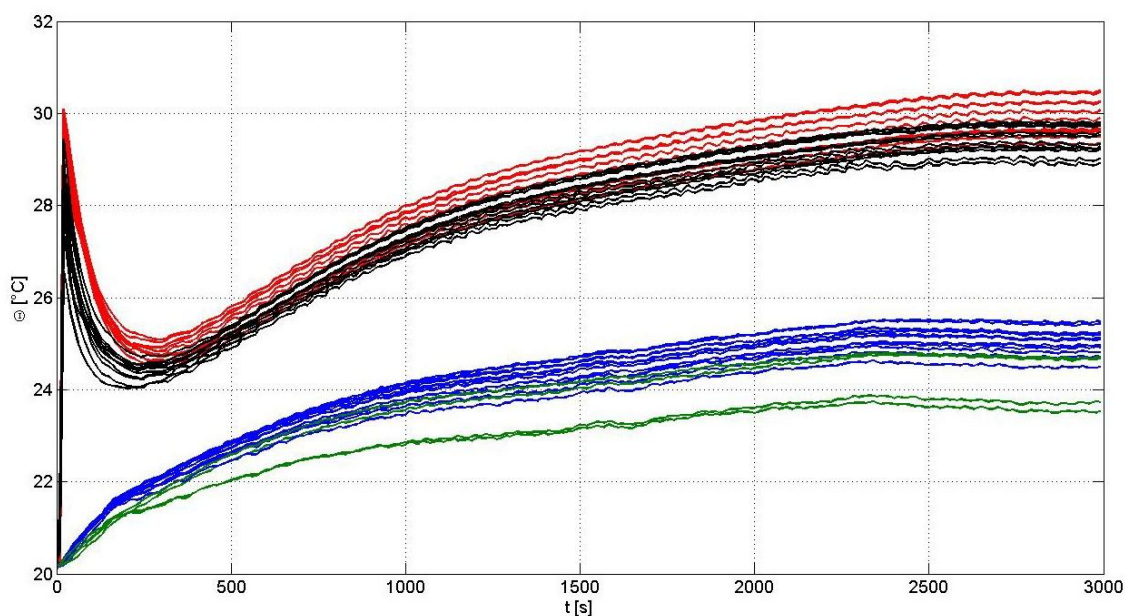
Obr. 5.4: Průběh oteplení při jmenovitých parametrech se zkratem V5-N



### 5.4.2 Napětí 115 V, žádný zkrat

Jelikož při fázovém napětí 230 V a nejmenším zkratu V5 – N dochází v místě zkratu k překročení maximální dovolené teploty, pro další měření jsme nuceni nějakým způsobem teplotu omezit. Nejjednodušší možností je snížit napájecí napětí, a proto pro následující měření nastavujeme na zdroji poloviční napájení, tj.  $3 \times 115 \text{ V}$ .

Jako první měření pro poloviční napájecí napětí bylo provedeno naprázdno a bez žádného zkratu. Výsledek tohoto měření je průběh oteplení na obr. 5.5. Barevné označení termočlánků je ponecháno (viz tab. 5.3: Barevné značení). Motor byl spuštěn přímým připojením k síti. Záběrný proud, který je několikrát vyšší než jmenovitý, způsobí okamžitě prudký vzrůst teploty ve vinutí. Po ustálení proudu na jmenovitou hodnotu se vinutí chvíli ochlazuje, ale následně opět stoupá po oteplovací křivce. Nutno podotknout, že při zatíženém motoru by byl proudový ráz mnohem vyšší. Protože záběrný proud trvá poměrně krátkou dobu, na oteplení vnějších částí AM se téměř neprojeví. Ustálené hodnoty se pohybují velmi nízko, to je způsobeno právě chodem naprázdno.

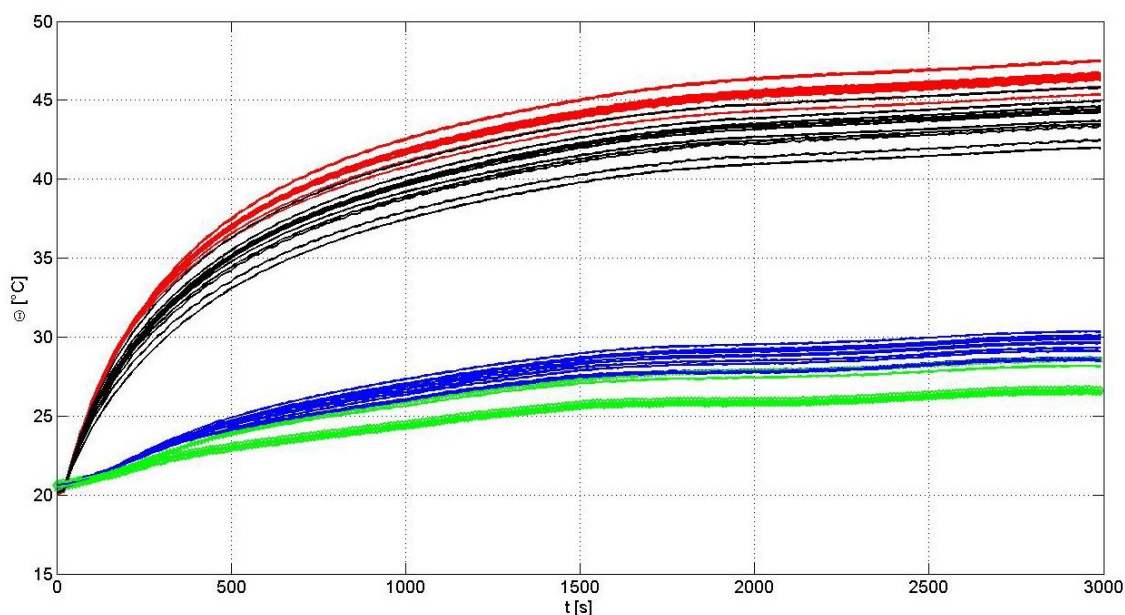


Obr. 5.5: Průběh oteplení při spuštění nezatíženého motoru napřímo při napájecím fázovém napětí 115 V

Graf z obrázku 5.6 odpovídá motoru napájeného fázovým napětím  $115\text{ V}$ , ve statoru žádný zkrat není, ale je zatížen. Moment na hřídeli motoru je úměrný druhé mocnině napájecího napětí, pro přepočet momentu tedy platí vztah:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{M_1^2}{M_2^2} \quad (4.1)$$

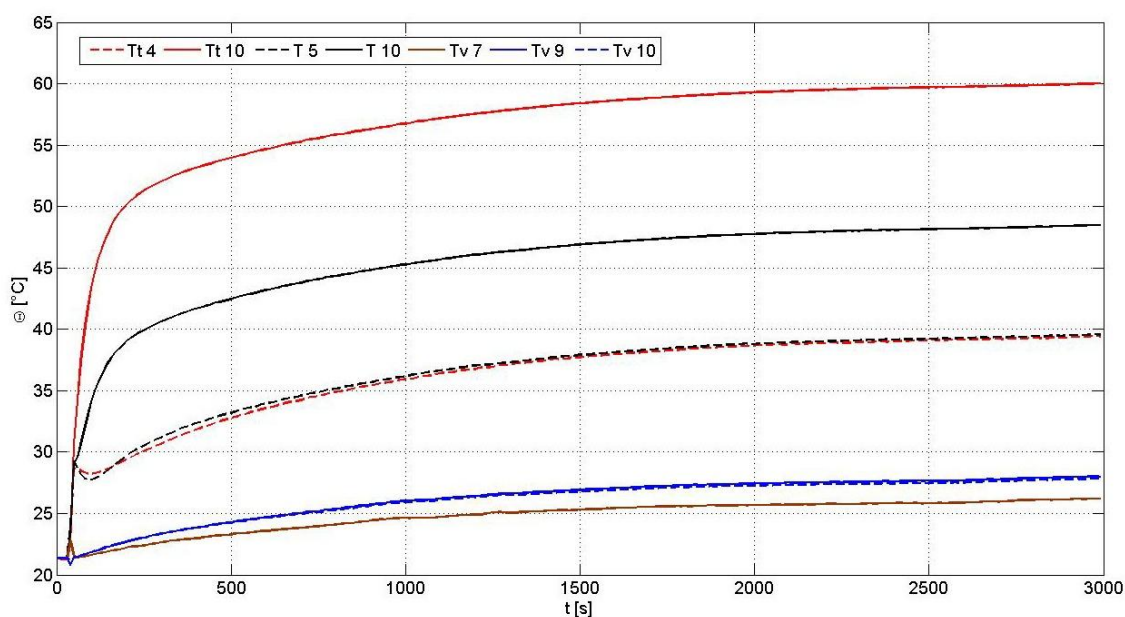
Námi používaný dynamometr umožňuje udržovat konstantní otáčky, čehož když využijeme, ponecháme jmenovité otáčky a nejsme nuceni zátěžový moment přepočítávat. Otáčky nejsou závislé na napájecím napětí, proto tedy nastavíme otáčky opět na  $2860\text{ min}^{-1}$ . Pro nastavení zátěže využíváme dynamometr jako pohon, protože i v tomto režimu zatěžovaný motor výkonově bezpečně pokryje. Moment místo  $4,54\text{ Nm}$ , jak bylo při  $U_f = 230\text{ V}$ , klesl na  $1,12\text{ Nm}$ , tzn. přibližně čtyřikrát. Pro obrázek 5.6 platí stejná rozdělení do oblastí jako v případě grafu 5.1 včetně barevného značení (Tab. 5.3), akorát ustálené teploty jsou úměrně napájecímu napětí zmenšeny. V tomto případě byl motor nejdříve dynamometrem roztočen na synchronní otáčky, poté připojen k napájení a následně zatížen. Takovýmto postupem eliminujeme záběrný proud a nedochází k proudovým rázům při spuštění motoru.



Obr. 5.6: Průběh oteplení zatíženého motoru při  $U_f = 115\text{ V}$

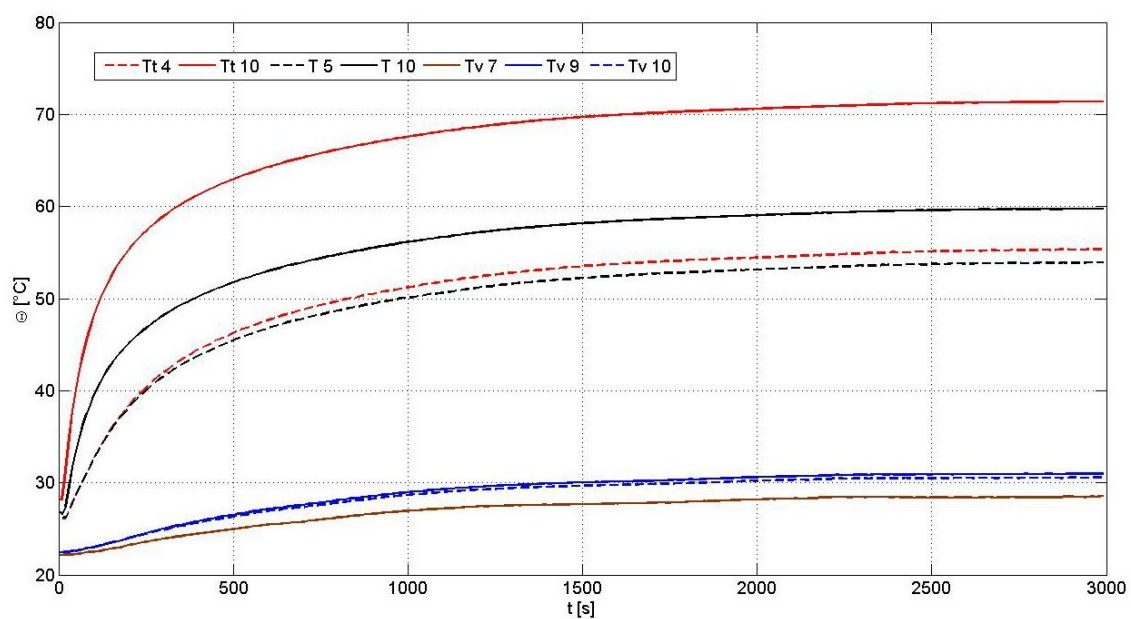
### 5.4.3 Napětí 115 V, zkrat V5-N

V následující části, jsou popsány průběhy pro zkrat pátého závitu (V5) s uzlem vinutí (N). Měření probíhalo jak naprázdno (Obr. 5.7), tak při zatížení (Obr. 5.8). V grafu na první pohled dominují teploty termočlánků Tt 10 a T 10. Z obrázku 4.2, kde je znázorněno rozmístění termočlánků ve vinutí, vidíme, že zvýšení teploty v těchto místech je logické, neboť se nacházejí nejbližže způsobenému zkratu. Ostatní čidla ve vinutí nevykazovala žádné překvapivé výsledky.



Obr. 5.7: Napájení 115 V, zkrat V5-N, naprázdno

Předpokládáme, že při zatíženém motoru a ponechaném zkratu se příliš mnoho rozdílů v teplotním poli neobjeví. Samozřejmostí je zvýšení teplot u všech čidel. Přírůstky teploty po zatížení jsou pro vybrané termočlánky uvedeny v tabulce 5.4. Protože měření neprobíhalo takovou dobu, abychom přesně odečetli ustálené hodnoty, v tabulce jsou uvedeny teploty v čase 2990 s, které se ustáleným hodnotám velmi přibližují.



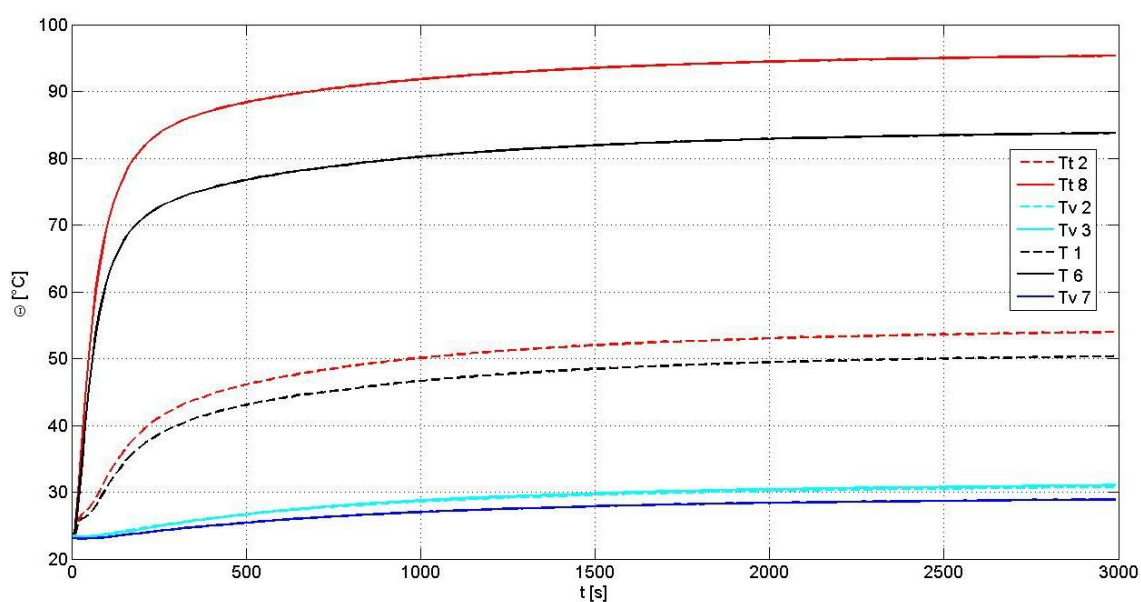
Obr. 5.8: Napájení 115 V, zkrat V5-N, zatížen

Tab. 5.4: Srovnání teplot při zkratu V5-N

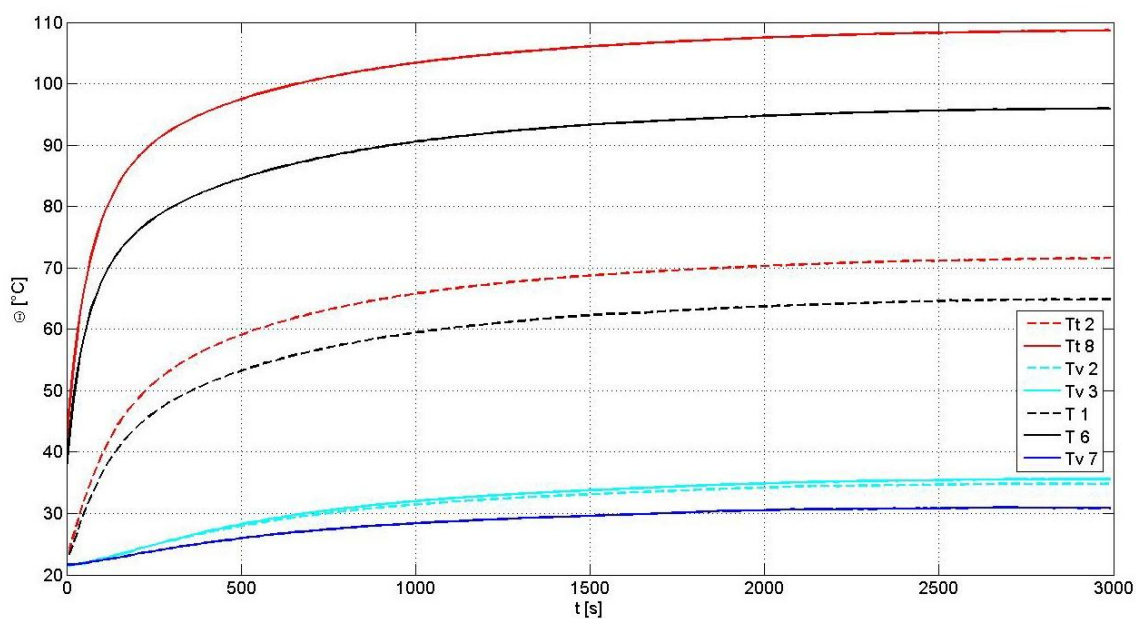
Termočlánek	Teplota [°C]		
	Chod naprázdno	Při zatížení	Přírůstek
Tt 10	60	71,4	11,4
Tt 4	39,4	55,3	15,9
T 10	48,5	59,8	11,3
T 5	39,6	53,9	14,3
Tv 7	26,2	28,6	2,4
Tv 9	28	31	3
Tv 10	27,8	30,6	2,8

#### 5.4.4 Napětí 115 V, zkrat U10-N

Vytvoříme-li zkrat o velikosti deseti závitů na vinutí U spojením svorek U10 a N, naměříme průběh oteplení na obrázku 5.9, pro motor běžící naprázdno, respektive na obr. 5.10 pro motor zatížený. Průběhy sledujeme u termočlánků nacházejících se poblíž prvních 124 závitů fáze U, protože u nich je největší pravděpodobnost většího oteplení. Teploty jsou v tomto případě značně vyšší než u předchozího pětizávitového zkratu. To je způsobeno právě velikostí zkratu, ale vliv na to může mít i přesné umístění termočlánku v konkrétní drážce nebo na čele vinutí. Víme, že termočlánek je někde na prvních 62 závitech, ale jestli je blíže k prvnímu, či právě k 62. závitu, je z obrázku 4.2 nejspolehlivější. Na povrchu elektromotoru vykazují nejvyšší teploty termočlánky Tv 2 a Tv 3. To nám napovídá, že zkrat se bude nacházet někde poblíž. Naopak nejchladnější byl termočlánek Tv 7 zřejmě kvůli lepšímu odvodu tepla v oblasti patek. Teplotní rozdíly v čase 2990 s mezi zatíženým a nezatíženým motorem jsou podrobně popsány v tabulce 5.5.



Obr. 5.9: Napájení 115 V, zkrat U10-N, naprázdno



Obr. 5.10: Napájení 115 V, zkrat U10-N, zatížen

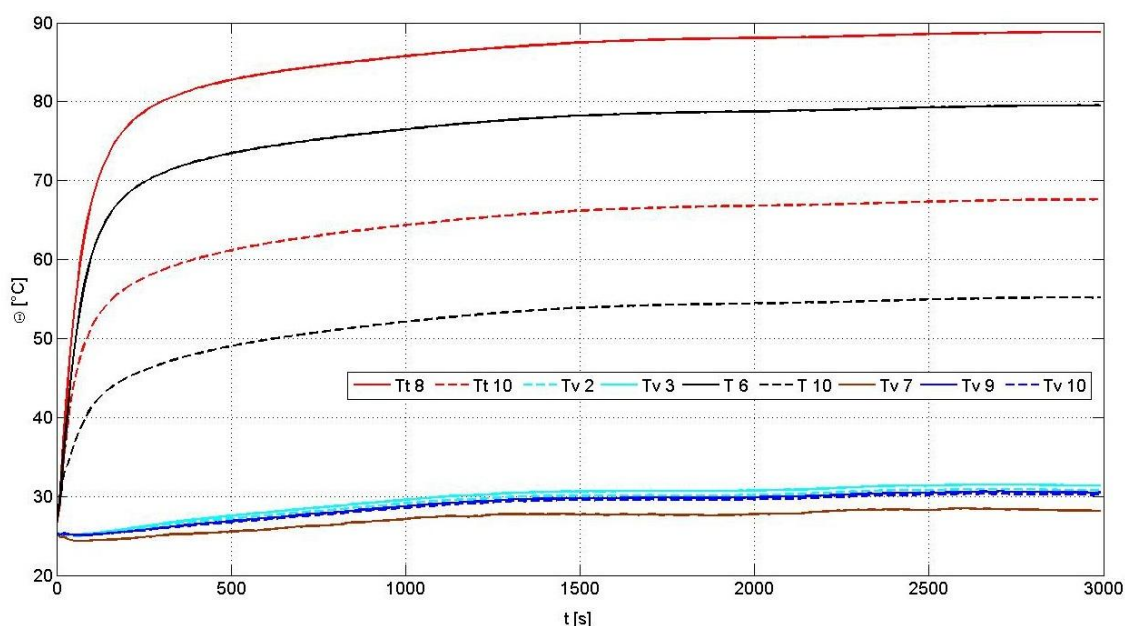
Tab. 5.5: Srovnání teplot při zkratu U10-N

Termočlánek	Teplota [°C]		
	Chod naprázdno	Při zatížení	Přírůstek
Tt 2	54	71,6	17,6
Tt 8	94,8	108,7	13,9
T 1	50,1	64,9	14,8
T 6	83,6	95,9	12,3
Tv 2	30,1	34,8	4,7
Tv 3	30,5	35,6	5,1
Tv 7	27,5	30,9	3,4



### 5.4.5 Napětí 115 V, zkrat U10-V5

Další měření probíhalo při stejných podmínkách jako předchozí měření. Nyní průběh ovšem odpovídá zkratu o velikosti 15 závitů, protože byly propojeny svorky U10 a V5. Opět měření probíhalo bez a se zatížením motoru, výsledkem jsou průběhy oteplení na obrázcích 5.11 a 5.12. Jelikož zkrat zasahuje do dvou fází, je označován jako mezizávitový. V podstatě se jedná o dva spojené zkraty U10-N a V5-N, proto si budeme všimnat především termočlánků, u kterých jsme pozorovali zvláštní průběhy u předchozích dvou měření.

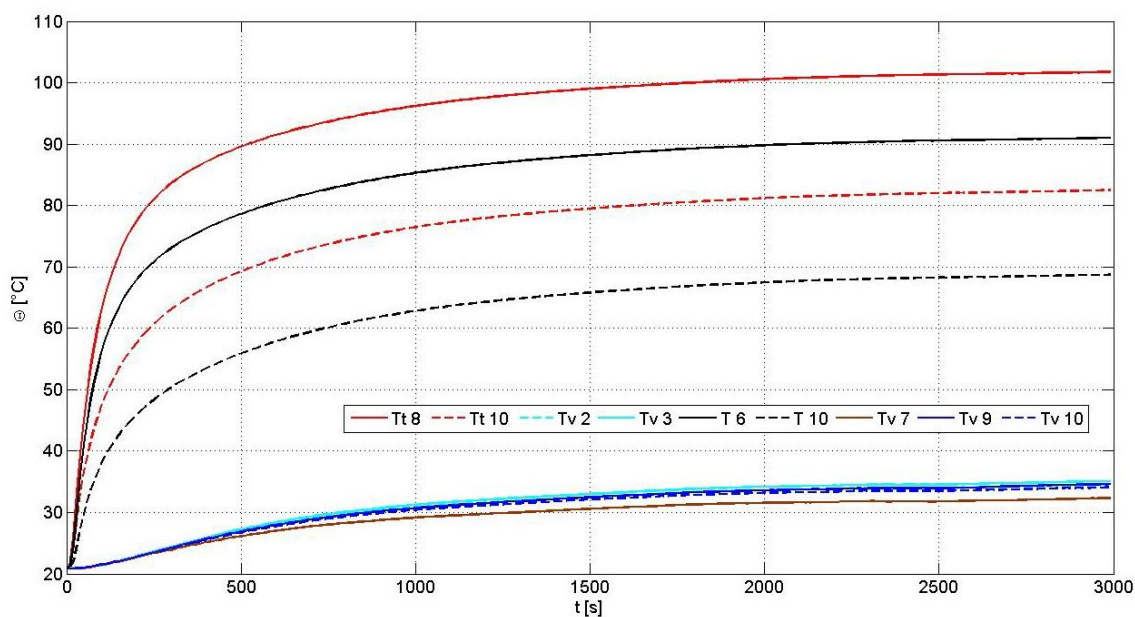


Obr. 5.11: Napájení 115 V, zkrat U10-V5, naprázdno

Tab. 5.6: Srovnání teplot U10-V5, naprázdno

	Termočlánek	Teplota [°C]		
Zkrat U10-N	Tt 8	94,8	88,8	Zkrat U10-V5
	T 6	83,6	79,5	
	Tv 2	30,1	30,8	
	Tv 3	30,5	31,4	
Zkrat V5-N	Tt 10	60	67,6	
	T 10	48,5	55,2	
	Tv 9	28	30,5	
	Tv 10	27,8	30,2	

Porovnáním hodnot z tohoto měření a z dvou předchozích získáme tabulku 5.6, ta je brána pro měření bez zátěže a pro hodnoty z konce měření, tzn. v čase 2990 s. Z této tabulky vyplývá, že oblasti, které byly nejteplejší při zkratu U10-N, se při zkratu U10-V5 zahřály o něco méně. Místa s nejvyšší teplotou při zkratu V5-N se naopak ještě více oteplila. Stejný jev pozorujeme i při porovnání měření se zatíženým motorem (Tab. 5.7). U senzorů umístěných vně motoru sledujeme zvýšení teploty na dvou místech, jednak kolem termočlánků Tv 2 a Tv3, a potom také u Tv 9, Tv 10. To je zřejmě způsobeno tím, že zkrat zasahuje jak do fáze U, tak i do fáze V.



Obr. 5.12: Napájení 115 V, zkrat U10-V5, zatížen

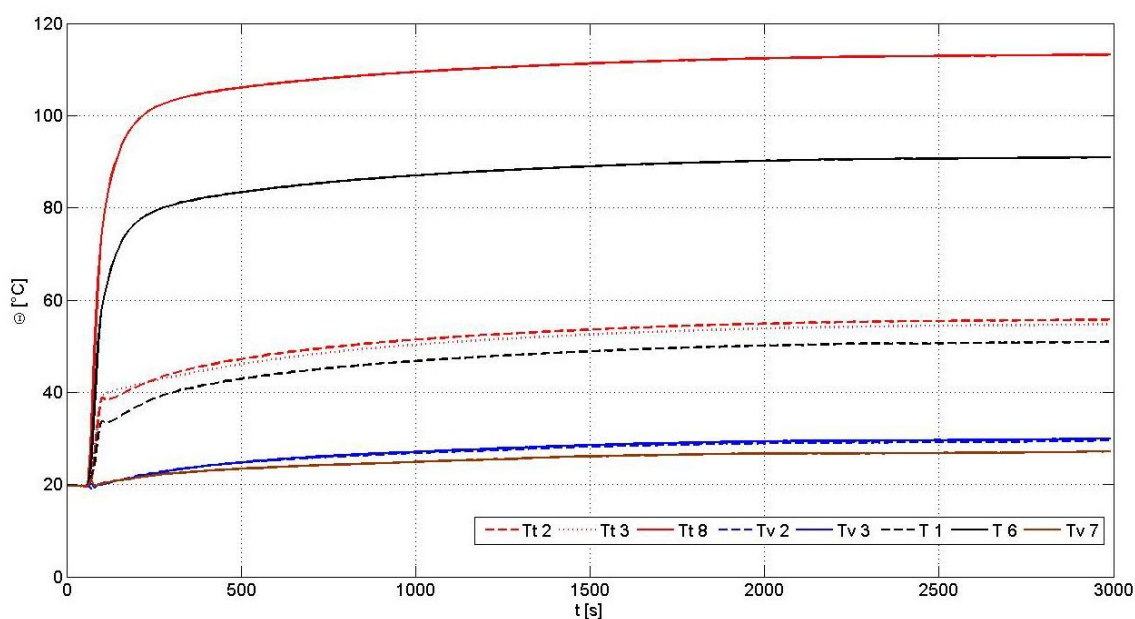
Tab. 5.7: Srovnání teplot U10-V5, zatížen

	Termočlánek	Teplota [°C]		
Zkrat U10-N	Tt 8	108,7	101,8	Zkrat U10-V5
	T 6	95,9	91	
	Tv 2	34,8	34,5	
	Tv 3	35,6	35,1	
Zkrat V5-N	Tt 10	71,4	82,5	
	T 10	59,8	68,7	
	Tv 9	31	34,6	
	Tv 10	30,6	34,1	



### 5.4.6 Napětí 115 V, zkrat U30-U20

Poslední dvojice experimentů se měřila při zkratu U30-U20. Stejně jako u měření při zkratu U10-N i zde se jedná o zkratovaných 10 závitů fáze U. Rozdíl je ale v tom, že nyní je zkrat posunut o 20 závitů směrem od svorky N. Teplotní čidla jsou rozmístěny po 62 závitech, takže bychom zvýšené teploty měli pozorovat u stejných senzorů jako v případě zkratu U10-N. U vnějších termočlánků očekáváme velmi podobné výsledky.

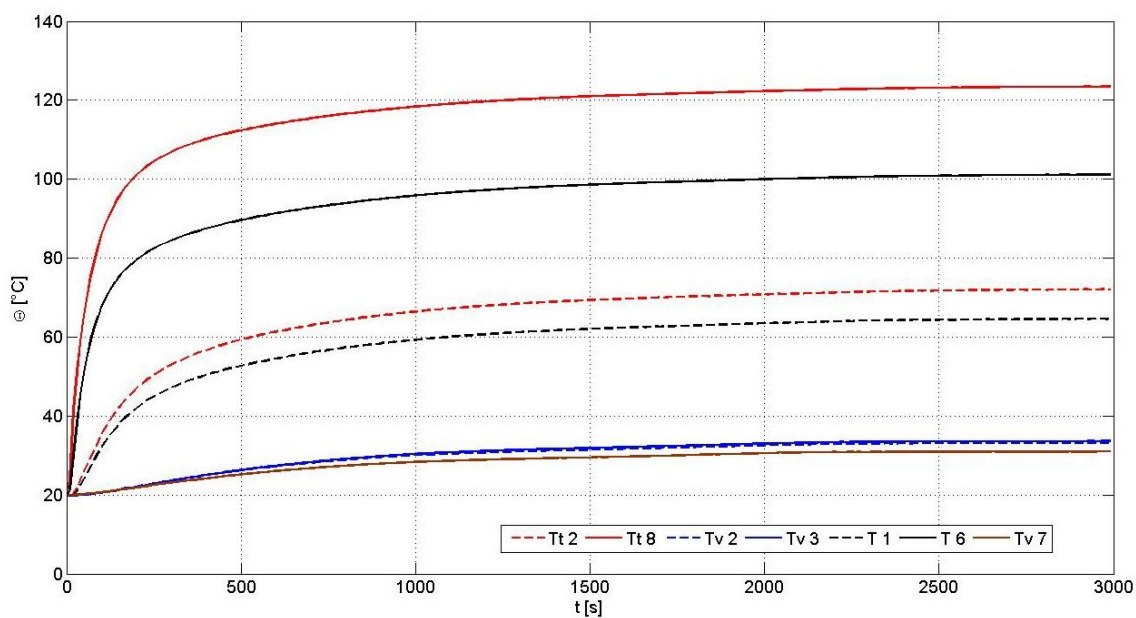


Obr. 5.13: Napájení 115 V, zkrat U30-U20, naprázdno

Z obrázku nahoře je patrné, že zvýšené hodnoty teploty vykazovaly stejné termočlánky jako při zkratu U10-N. V tomto případě, ale senzory umístěné ve vinutí vykazují vyšší teploty. Vzhledem k tomu, že zkrat je počtem závitů stejný, příčinou nejspíše bude poloha termočlánku. Jak už bylo řečeno, neznáme přesnou polohu čidla ve vinutí, víme pouze, že je umístěn v oblasti 62 závitů. Vnější čidla nabývala dle očekávání téměř shodných hodnot. Srovnání teplot pro nezatížený motor je znázorněno v tabulce 5.8. Zatíženému motoru patří průběh na obrázku 5.14 a tabulka 5.9.

Tab. 5.8: Srovnání U10-N a U30-U20 pro nezatížený motor

Termočlánek	Zkrat U10-N	Zkrat U30-U20
Tt 2	54 °C	55,8 °C
Tt 8	94,8 °C	113,2 °C
T 1	50,1 °C	50,9 °C
T 6	83,6 °C	91 °C
Tv 2	30,1 °C	29,6 °C
Tv 3	30,5 °C	30 °C
Tv 7	27,5 °C	27,2 °C



Obr. 5.14: Napájení 115 V, zkrat U30-U20, zatížen

Tab. 5.9: Srovnání U10-N a U30-U20 pro zatížený motor

Termočlánek	Zkrat U10-N	Zkrat U30-U20
Tt 2	71,6 °C	72,1 °C
Tt 8	108,7 °C	123,4 °C
T 1	64,9 °C	64,7 °C
T 6	95,9 °C	101,2 °C
Tv 2	34,8 °C	33,2 °C
Tv 3	35,6 °C	33,7 °C
Tv 7	30,9 °C	31 °C

## Závěr

V této práci bylo provedeno několik měření pro analýzu teplotního pole asynchronního motoru. Výsledky byly zpracovány, a jevy, ke kterým během měření docházelo, jsou v hlavní části zprávy podrobně popsány.

Pracoviště navržené v práci [4] bylo potřeba upravit jen nepatrně. Naše pracoviště se od toho navrženého liší pouze o doplněný dynamometr a v napájecím zdroji.

Abychom vůbec mohli provádět měření s různými zkraty ve statorovém vinutí, museli jsme snížit napájecí napětí. I přes to jsme ale byli omezeni a při větším zkratu než 15 závitů docházelo ke zvýšení teploty nad dovolenou mez a hrozilo poškození stroje. S termočlánky umístěnými ve statorovém vinutí jsme schopni poměrně přesně určit, v jakém místě ke zkratu došlo. Jestliže však máme identifikovat zkrat pomocí teplotních senzorů umístěných vně elektromotoru, tak jednoznačné to již není. Povrch motoru je dobře ofukován proudícím vzduchem od ventilátoru, tím pádem povrch je mnohem chladnější a i rozdíly teplot jsou menší. Přesto lze upozorovat při jednotlivých zkratech zvýšení teploty v daných oblastech. Při zkratu V5-N vykazovala nejvyšší teplotu čidla Tv 9 a Tv 10, při U10-N a U30-U20 zase Tv 2 a Tv 3. Pohledem na obrázek 4.3 zjistíme, že tyto oblasti jsou oproti sobě posunuté o úhel přibližně 120°. Tento úhel odpovídá právě geometrickému posunutí fáze U a V. Můžeme tedy tvrdit, že tyto zkraty jsme schopni diagnostikovat pomocí senzorů umístěných jen vně motoru. Průběhy termočlánků umístěných v blízkosti patek dosahovaly nižších teplot zřejmě díky lepšímu odvodu tepla. Proto zkrat ve statorovém vinutí, který by se nacházel poblíž patek, by se identifikoval nejspíš mnohem hůře. Bohužel pro menší počet odboček na vinutí W jsme nemohli toto tvrzení prakticky ověřit.

Přesnější identifikace zkratu by se nejspíš dalo dosáhnout větším počtem teplotních senzorů umístěných na povrchu motoru, či pouhým přemístěním většiny čidel do oblasti zvýšené teploty. Zajímavé by také mohlo být sledovat závislost teplotního pole na okolní teplotě nebo porovnat naměřené hodnoty s měřením teplot motoru o jiných parametrech.

# Literatura

- [1] KOHOUT, Luděk. *Snímače teploty* [online]. 2008, [cit. 2011-04-29]. Dostupný z WWW: <[www.edumat.cz](http://www.edumat.cz)>.
- [2] POKORNÝ, Karel. *Stavba elektrických strojů I*. 1984. vyd. Praha : SNTL, 1984. 180 s.
- [3] *Programmable AC Source 61701/61702/61703/61704 User's manual*. Chroma ATE, Inc., 2005. 129 s. Dostupný z WWW: <<http://www.chromaate.com>>.
- [4] MIZERA, Zdeněk. *Návrh měřicího pracoviště pro měření teplotního pole v asynchronním elektromotoru*. Liberec, 2009. 66 s. Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky. Vedoucí diplomové práce Leoš Beran.
- [5] Leoš Beran a kol. *Návod dynamometr Dynofit*. 2010. 25 s.
- [6] *Agilent* [online]. c2009 [cit. 2011-04-5]. Dostupný z WWW: <<http://www.agilent.com>>.
- [7] ČSN EN 60034-18-1 (35 0000) *Točivé elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství norem, 1995. 24 s.
- [8] ČSN EN 60034-11 (35 0000) *Točivé elektrické stroje*. Praha: Vydavatelství norem, 1991. 16 s.
- [9] PAVELKA, Jiří, ČEŘOVSKÝ, Zdeněk, JAVŮREK, Jiří. *Elektrické pohony*. 2001. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. 222 s.